

扫描曝光系统中二维工作台 x 轴测量镜的面形在线检测

刘兆武^{1,2}, 李文昊², 巴音贺希格², 宋莹², 姜珊², 李晓天², 吕强^{1,2}

¹中国科学院大学大珩学院, 北京 100049;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家光栅制造与应用工程技术研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 为了提高二维工作台的定位精度,提出了一种在线检测二维工作台 x 轴测量镜面形的方法。无需 y 轴测量镜,利用三路激光干涉仪检测工作台 x 轴测量镜的二次微分信息,对所得数据进行二次积分得到工作台测量镜的精确面形。分析了零点误差对工作台测量镜面形误差检测的影响,并提出了相应的校正方案。对所提出的方法进行了理论推导和实验验证,结果表明,所提方法的检测重复精度优于 2.6521 nm,验证了该方法对工作台测量镜面形误差检测的正确性,并且可对工作台 x 轴测量镜的面形误差进行实时补偿。

关键词 测量; 光检测技术; 二维工作台; 测量镜面形; 光栅; 激光干涉仪

中图分类号 TN247; TH741; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0104004

Profile Online Detection for Two-Dimensional Stage x Axis Mirror in Scanning Exposure Systems

Liu Zhaowu^{1,2}, Li Wenhao², Bayanheshig², Song Ying²,
Jiang Shan², Li Xiaotian², Lü Qiang^{1,2}

¹Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²National Engineering Research Center for Diffraction Gratings Manufacturing and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To improve the location accuracy of two-dimensional stage, a profile online detection method for two-dimensional stage x axis mirror is proposed. Without the y axis mirror, the quadratic differential information of the stage x axis mirror is detected by the three-path laser interferometer. The quadratic integral is conducted for the obtained data to obtain the accurate profile of stage mirror. The influence of zero error on the profile deviation detection for stage mirror is analyzed and a corresponding calibration scheme is proposed. Theoretical analysis and experimental verification are conducted for the proposed method. The results show that the accuracy of detection repeatability is better than 2.6521 nm by the proposed method, the correctness of the profile deviation detection for stage mirror is verified, and the real-time compensation for the profile deviation of the stage x axis mirror is achieved.

Key words measurement; optical detection technology; two-dimensional stage; mirror profile; grating; laser interferometer

OCIS codes 040.1880; 120.4630; 120.0120; 050.2770

收稿日期: 2016-09-23; 收到修改稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(61227901)

作者简介: 刘兆武(1987—),男,博士研究生,主要从事全息曝光系统的制作和精密位移测量等方面的研究。

E-mail: zhaowuliu@hotmail.com

导师简介: 李文昊(1980—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺方面的研究。E-mail: liwh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

扫描干涉场曝光系统(SBIL)在一定程度上融合了全息光栅、激光直写及刻画光栅的制作特点,且具有独特的优势,成为大口径光栅制作的发展方向之一^[1-2]。该系统采用工作台二维运动的方式,平行条纹方向(y 轴)的扫描将干涉条纹记录于涂有光刻胶的基底上,垂直条纹方向(x 轴)的步进使得相邻扫描周期之间的干涉条纹在相位上实现精确拼接,从而实现大面积光刻胶光栅掩模的制作^[3-4]。因此,工作台的定位误差,特别是垂直条纹方向的定位误差,成为影响光栅制作的关键因素之一^[5]。

目前,纳米精度的二维工作台通常采用双频激光干涉仪定位系统^[6-7],在工作台的运动过程中保持参考镜静止不动,测量镜随工作台运动,由多普勒原理计算得到测量镜与参考镜之间的相对位移,从而得到工作台的精确位置。当工作台沿平行于测量镜的镜面方向运动时,工作台测量中将引入测量镜加工的面形误差以及装调引起的面形变化。为解决这一问题,对工作台测量镜的面形误差进行精密在线检测。

Whitehouse^[8]提出了一种多探测器扫描技术,即误差分离技术。该技术广泛应用于精密测量领域。两点探测技术是最简单的多探测器扫描技术,可以分离被测件的面形误差和工作台运行过程中的平移误差,而工作台运行的偏摆误差则需要额外的探测器进行校正。传统工作台测量镜的面形检测方法多为两点探测法^[9-10],该方法的原理为:检测 x 轴测量镜的面形时,利用 y 轴测量镜校正工作台运行过程中的偏摆误差;同理,检测 y 轴测量镜的面形时,利用 x 轴测量镜校正工作台运行过程中的偏摆误差。该方法可以同时检测 x 、 y 轴测量镜的面形,适用于二维工作台测量镜的面形检测。然而,对于1.5 m的扫描干涉场曝光系统来说,对工作台 y 轴的定位精度要求并不高,利用光栅尺可以满足 y 轴的定位需求。若利用 y 轴测量镜校正工作台运行过程中的偏摆误差,附加的大尺寸和大质量的 y 轴测量镜会影响工作台的运行性能,并在光栅制作过程中引起其他问题。

三点探测法可以分离工作台运行过程中的平移误差和偏摆误差^[11-12],广泛应用于工件三维直线度检测中。运用三点探测法检测工作台 x 轴测量镜的面形,无需利用 y 轴测量镜,直接对 x 轴测量镜的面形进行检测,但是该方法中探测器的零点偏差会在检测结果中引入二次误差项。在工件直线度检测中,利用位于待测件两侧的两组三点探测器,当待测工件旋转 180° 时,对其进行二次检测,以消除零点误差,这种方法不适用于工作台测量镜的面形检测,因此限制了三点探测法的应用。

本文针对1.5 m扫描干涉场曝光系统工作台测量镜的检测需求,提出了一种新的工作台测量镜的面形检测方法,无需运用 y 轴测量镜,采用三路等间距的双频激光干涉仪对工作台 x 轴测量镜的面形进行检测,从而减小了工作台的额外负担,提高了工作台的运行性能。分析了零点误差对工作台测量镜面形误差检测的影响,提出了消除零点误差的校正方法,得到精确的测量镜面形误差。

2 测量镜的面形检测原理

2.1 基本原理

工作台 x 轴测量镜的面形误差检测示意图如图1所示,工作台沿 y 轴运动,设 x 轴测量镜的面形函数为 $E_x(y)$,A、B、C为间距为 d 、沿 y 轴等间距分布的3个激光干涉计,工作台运行至 y_i 位置时,A、B、C的测量值 $x_a(y_i)$ 、 $x_b(y_i)$ 、 $x_c(y_i)$ 分别为

$$x_a(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i - d) + \Delta_x(y_i) - d\theta(y_i), \quad (1)$$

$$x_b(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i) + \Delta_x(y_i), \quad (2)$$

$$x_c(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i + d) + \Delta_x(y_i) + d\theta(y_i), \quad (3)$$

式中 $x(y_i)$ 为工作台运行至位置 y_i 时 x 方向的实际位移, $\Delta_x(y_i)$ 为工作台运行过程中的平移误差, $\theta(y_i)$ 为工作台运行过程中的偏摆误差。根据两点探测法,将(1)、(2)式和(2)、(3)式分别相减可消除工作台运行过程中的平移误差,即

$$x_b(y_i) - x_a(y_i) = E_x(y_i) - E_x(y_i - d) + d\theta(y_i), \quad (4)$$

$$x_c(y_i) - x_b(y_i) = E_x(y_i + d) - E_x(y_i) + d\theta(y_i)。 \quad (5)$$

根据三点探测法,将(4)、(5)式相减可消除工作台运行过程中的偏摆误差,即

$$\Delta\theta(y_i) = x_c(y_i) - 2x_b(y_i) + x_a(y_i) = E_x(y_i + d) - 2E_x(y_i) + E_x(y_i - d), \quad (6)$$

式中 $\Delta\theta(y_i)$ 为干涉仪的测量值。由于精密加工的测量镜面形曲线变化小, x 轴测量镜面形函数的二次导数可近似为

$$E_x''(y_i) \approx \left[\frac{E_x(y_i + d) - E_x(y_i)}{d} - \frac{E_x(y_i) - E_x(y_i - d)}{d} \right] \frac{1}{d} = \frac{\Delta\theta(y_i)}{d^2}. \quad (7)$$

对(7)式进行积分, 得到 x 轴测量镜的面形误差为

$$E_x(y_i) = E_x(y_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \frac{\Delta\theta(y_j)}{d^2} \delta^2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

式中 δ 为检测过程中的采样周期。

积分累计误差是测量光束的中心间距 d 与采样周期 δ 的函数, 同时也与被检表面面形误差的空间频率有关。采样周期与测量光束的中心间距越接近, 积分累计误差越小, 当 $\delta = d$ 时, 积分累计误差为零^[13]。这里均采用与测量光束的中心间距相等的采样周期。

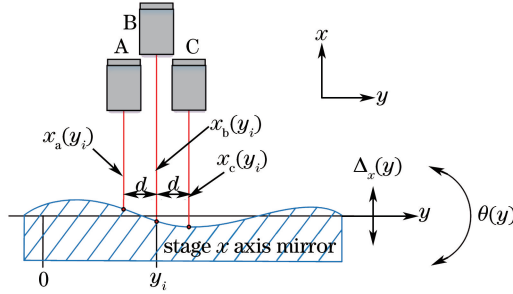


图 1 工作台 x 轴测量镜的面形误差检测示意图

Fig. 1 Schematic of profile deviation detection for stage x axis mirror

2.2 零点误差

干涉仪测距为相对位移测量, 测量的初始位置作为干涉仪零点, 即干涉仪零点不一定是测量面的绝对零点, 如图 2(a) 所示。设 x 轴干涉仪的零点偏差分别为 e_a, e_b, e_c , 则(1)~(3)式可表示为

$$x_a(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i - d) + \Delta_x(y_i) - d\theta(y_i) - e_a, \quad (9)$$

$$x_b(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i) + \Delta_x(y_i) - e_b, \quad (10)$$

$$x_c(y_i) = x(y_i) + E_x(y_i + d) + \Delta_x(y_i) + d\theta(y_i) - e_c. \quad (11)$$

因此, 测量镜的面形误差可表示为

$$E_x(y_i) = E_x(y_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k E_x''(y_j) \delta^2 - \frac{\alpha}{2d^2} y_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

式中 α 为干涉仪的零点偏差, $\alpha = (e_c - e_b) + (e_a - e_b) = e_c - 2e_b + e_a$ 。可以看出, α 将在测量镜的面形计算中引入二次误差 $\alpha y_i^2/d^2$, 也称为零点误差, 如图 2(b) 所示。

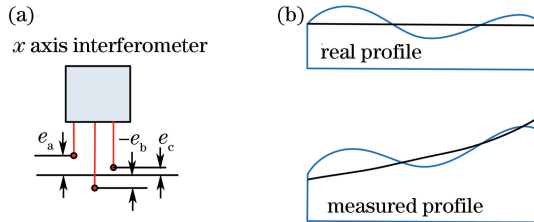


图 2 (a)干涉仪相对位移测量示意图; (b)工作台测量镜零点误差

Fig. 2 (a) Diagram of relative displacement measurement of interferometer; (b) zero error of stage mirror

2.3 零点误差消除方法

零点偏差在长行程测量中引入较大的零点误差, 如图 3 所示, 当测量光束的中心间距 $d = 10$ mm 和 $d = 20$ mm 时, $\alpha = 5$ nm 的零点偏差在长度为 700 mm 的测量镜面形检测中分别产生了 11.937 μm 和 2.9843 μm

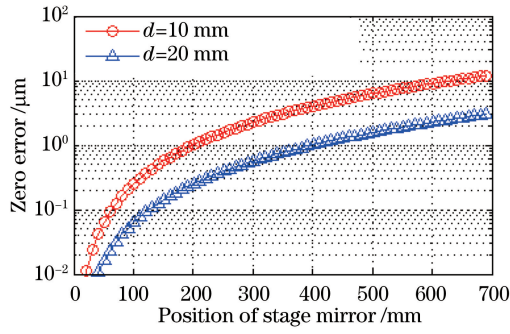


图 3 $\alpha=5 \text{ nm}$ 的零点偏差引起的零点误差

Fig. 3 Zero error caused by zero deviation when $\alpha=5 \text{ nm}$

的零点误差。采用标准镜标定干涉仪零点,只要使 3 个零点处于一条直线,便可消除零点误差。但是,目前的光学加工技术很难实现如此精密的标准镜,且同时进行标定与测量不利于消除零点误差。

测量开始后,零点误差的二次项系数为恒定值。对零点误差系数进行标定,具体标定过程如下:

1) 正式测量开始前,工作台运行一个周期,利用上述方法计算得到的测量镜面形误差为

$$f(y_i) = E_x(y_i) + \frac{\alpha}{2d^2}y_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (13)$$

2) 将测量镜两端作为零点基准,即设 $E_x(y_0) = E_x(y_n) = 0$, 则这两点的测量值即为零点误差,可表示为

$$\begin{cases} f(y_0) = \frac{\alpha}{2d^2}y_1^2 = 0 \\ f(y_n) = \frac{\alpha}{2d^2}y_n^2 \end{cases}; \quad (14)$$

3) 利用(14)式,计算得到零点误差系数为

$$\alpha = \frac{f(y_n) 2d^2}{y_n^2}; \quad (15)$$

4) 测量开始后,将(15)式代入(12)式,得到测量镜的面形误差为

$$E_x(y_i) = E_x(y_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k E_x''(y_j) \delta^2 - \frac{f(y_n)}{y_n^2} y_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

2.4 误差分析

通常,当 $E_x(y_0) = 0$ 时, $E_x(y_n) \neq 0$ 。上述标定过程中假设 $E_x(y_0) = E_x(y_n) = 0$, 则面形检测过程中存在的面形误差为

$$f(y_i) = E_x(y_i) - \frac{E_x(y_n)}{y_n} y_i + \frac{\alpha}{2d^2} y_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

当 $E_x(y_n) \neq 0$ 时,零点误差为

$$\begin{cases} f(y_0) = \frac{\alpha}{2d^2} y_1^2 = 0 \\ f(y_n) = \frac{\alpha}{2d^2} y_n^2 + E_x(y_n) \end{cases}. \quad (18)$$

实际测得的测量镜面形误差为

$$E_x(y_i) = E_x(y_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k E_x''(y_j) \delta^2 - \frac{E_x(y_n)}{y_n} y_i - \frac{f(y_n) - E_x(y_n)}{y_n^2} y_i^2. \quad (19)$$

比较(16)、(19)式,得到上述标定方法的检测误差为

$$e = \frac{E_x(y_n)}{y_n} y_i - \frac{E_x(y_n)}{y_n^2} y_i^2. \quad (20)$$

根据经验, $E_x(y_n) \leq 20 \text{ nm}$, 则上述方法的最大检测误差为

$$\max(e) = \frac{E_x(y_n)}{4} \leq 5 \text{ nm}。 \quad (21)$$

3 实验验证及结果讨论

实验系统示意图如图 4 所示,图中 1 为工作台,2 为 x 轴测量镜,3 为波长跟踪器,4 为测量干涉仪,5 为折光镜和分束镜。工作台在万级洁净间的气浮隔振平台上运行,检测光路暂无密封装置,被检测测量镜的长度为 300 mm,有效可检测长度为 228.6 mm。位移测量采用 3 台差分干涉仪(Agilent 10719A),干涉仪测量光束间距 $d=12.7$ mm。为消除积分累积误差,设空间采样频率 $\delta=12.7$ mm。工作台每运行 12.7 mm 便采集 1000 个数据,取数据平均值作为该点面形数据,以减小噪声的影响。对工作台测量镜进行 10 次检测,每次检测共采集 18 组数据。实验中采用波长跟踪器测量检测光路中的大气折射率,进而对该检测系统的环境误差进行补偿。

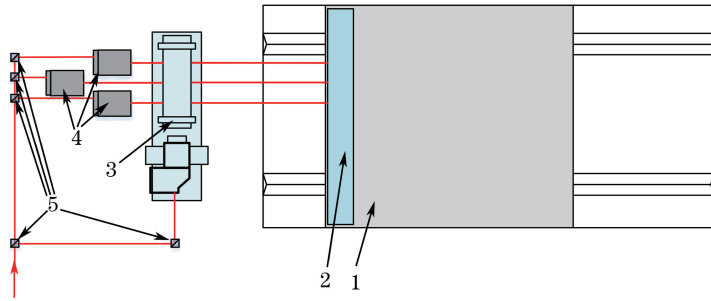


图 4 实验系统示意图

Fig. 4 Diagram of experimental system

图 5(a)为同等实验条件下对工作台测量镜的面形进行 10 次测量的初始结果,其中包含由零点偏差引起的零点误差。为消除零点误差,以测量镜两端为零点基准,利用(15)式计算零点误差系数,将该系数代入(16)式得到测量镜的面形误差。图 5(b)~(d)分别为去除零点误差后的 10 次测量的测量结果、平均值和标准偏差。实验结果表明,在同等实验条件下,测量镜的最大面形误差约为 90 nm,10 次测量的面形误差的最大标准偏差为 2.6521 nm。

在实际应用中,检测系统受环境的影响会产生随机的漂移,导致测量数据不准确。实验中采用波长跟踪器对检测光路中的大气折射率进行测量,进而对该检测系统的环境误差进行补偿。

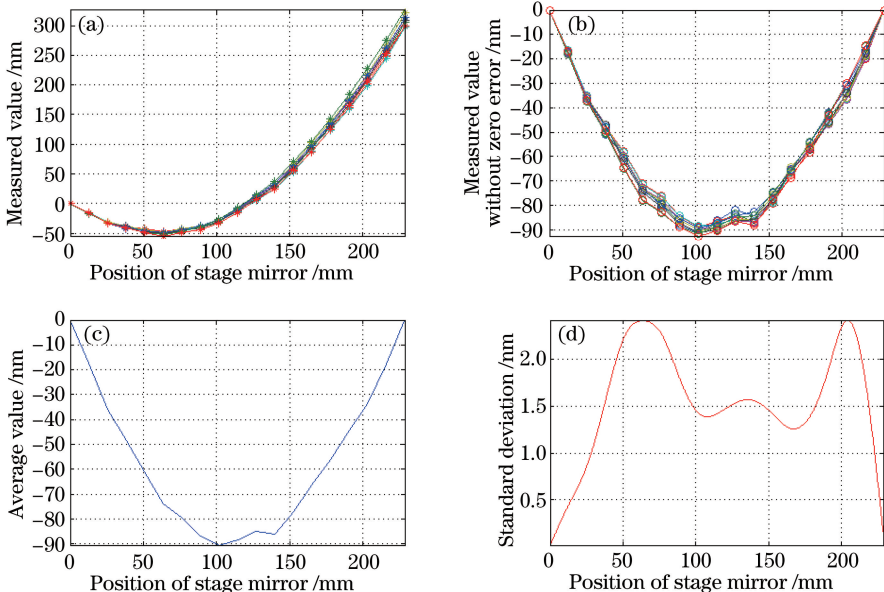


图 5 (a)初始结果;去除零点误差后的(b)测量结果、(c)平均值和(d)标准偏差

Fig. 5 (a) Original results; (b) measured results, (c) average value and (d) standard deviation after eliminating zero error

4 结 论

提出了一种新的工作台测量镜面形检测方法,无需 y 轴测量镜,采用三路等间距双频激光干涉仪检测二维工作台 x 轴测量镜的面形,减小了工作台的额外负担,提高了工作台的运行性能。针对零点误差引起的二次误差,提出了消除零点误差的校正方法,得到了精确的测量镜面形误差。实验结果表明,所提方法的检测重复精度优于 2.6521 nm,该方法可以对测量镜的面形误差进行实时补偿。

参 考 文 献

- [1] Jiang Shan, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.* An accurate method for stage interference fringe period in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705001.
姜 珊, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期精确测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0705001.
- [2] Cheng Weilin, Zhu Jing, Zhang Yunbo, *et al.* Status and development of scanning beam interference lithography system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100001.
程伟林, 朱 菁, 张运波, 等. 扫描干涉场曝光中关键技术的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100001.
- [3] Montoya J C, Chang C H, Heilmann R K, *et al.* Doppler writing and linewidth control for scanning beam interference lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2005, 23(6): 2640-2645.
- [4] Zhao Y, Trumper D L, Heilmann R K, *et al.* Optimization and temperature mapping of an ultra-high thermal stability environmental enclosure[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1): 164-170.
- [5] Song Ying, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 318-324.
宋 莹, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 318-324.
- [6] Gao Z Y, Hu J C, Zhu Y, *et al.* A new 6-degree-of-freedom measurement method of X-Y stages based on additional information[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 606-620.
- [7] Torralba M, Yagüe-Fabra J A, Aguilar J A, *et al.* Design optimization for the measurement accuracy improvement of a large range nanopositioning stage[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 1-19.
- [8] Whitehouse D J. Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1976, 9(7): 531-536.
- [9] He Le, Wang Xiangzhao, Ma Mingying. Non-flatness measurement of wafer stage mirrors in a step-and-scan lithographic tool[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(4): 519-525.
何 乐, 王向朝, 马明英. 一种测量光刻机工件台方镜不平度的新方法[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 519-525.
- [10] Montoya J, Heilmann R K, Schattenburg M L. Stage two-axis stage mirror non-flatness using linear/angular interferometers[C]. *Proceedings of the 19th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, 2004, 34: 382-385.
- [11] Gao W, Yokoyama J, Kojima H, *et al.* Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(3): 279-288.
- [12] Gao Wei, Yokoyama J, Kiyono S, *et al.* A scanning multiprobe straightness measurement system for alignment of linear collider accelerator[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295(296): 253-258.
- [13] Liu Zhaowu, Li Wenhao, Wang Jingkai, *et al.* Online detection of profile deviation for nanoprecision 2-D stage mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 40-47.
刘兆武, 李文昊, 王敬开, 等. 纳米精度二维工作台测量镜的面形误差在线检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 40-47.